SINERGI *Polmed*: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

PENGARUH VARIASI PUTARAN MESIN DIESEL TERHADAP KAPASITAS PRODUKSI, EFISIENSI PEMANFAATAN BAHAN, DAN KUALITAS FISIK PELET PAKAN BERBAHAN CAMPURAN SERBUK GERGAJI PADA MESIN *PELLETIZER FLAT DIE*

Aulia Rahman[a], Suherman[a*]

[a]*Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia*

**Penulis korespondensi: suherman@umsu.ac.id; suherman.me.umsu@gmail.com, (Suherman), Tel.: +62838-3362-1569*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 22 Agustus 2026
Direvisi pada 06 Oktober 2026
Disetujui pada 28 Oktober 2026
Tersedia daring pada 18 November 2026

Kata kunci:
Mesin *pelletizer*, putaran mesin, efisiensi pemanfaatan bahan, kualitas fisik pelet, serbuk gergaji.

Keywords:
Pelletizer machine, engine speed, material utilisation efficiency, pellet physical quality, sawdust.

ABSTRAK

Peningkatan putaran mesin *pelletizer* dapat meningkatkan kapasitas produksi, tetapi berpotensi menurunkan mutu fisik pelet akibat berkurangnya waktu tinggal bahan di zona pemadatan. Penelitian ini menganalisis pengaruh putaran mesin diesel Dong Feng (1200, 1500, dan 1800 rpm) terhadap kapasitas produksi, efisiensi pemanfaatan bahan (rendemen massa), dan kualitas fisik pelet pakan yang mengandung 6% serbuk gergaji pada mesin *pelletizer flat die and roller*. Percobaan menggunakan Rancangan Acak Lengkap satu faktor dengan tiga ulangan (5 kg bahan per unit percobaan). Kualitas fisik pelet dikarakterisasi melalui *bulk density*, densitas pelet, *Pellet Durability Index* (PDI), kekuatan tekan, dan kadar air menggunakan prosedur baku, sedangkan data dianalisis dengan ANOVA satu arah dan uji Tukey ($\alpha = 0{,}05$). Peningkatan putaran dari 1200 menjadi 1800 rpm menurunkan waktu proses secara nyata dari $11{,}5 \pm 0{,}1$ menjadi $9{,}1 \pm 0{,}1$ menit ($p < 0{,}001$) dan meningkatkan kapasitas produksi dari 24,0 menjadi 28,7 kg/jam, tetapi efisiensi pemanfaatan bahan turun dari 92% menjadi 87%. *Bulk density*, densitas pelet, PDI, dan kekuatan tekan masing-masing menurun dari 685 menjadi 628 kg/m³, 1.215 menjadi 1.156 kg/m³, 97,2% menjadi 91,5%, dan 268 menjadi 198 N. Analisis multikriteria berbobot dengan uji sensitivitas menunjukkan bahwa 1200 rpm merupakan kondisi terbaik di antara taraf yang diuji dengan bobot kapasitas produksi kurang dari 0,41, sedangkan 1500 rpm menjadi pilihan kompromi apabila produktivitas lebih diprioritaskan. Karena 1200 rpm merupakan batas bawah rentang uji, titik optimum sebenarnya masih perlu dikonfirmasi melalui pengujian pada putaran yang lebih rendah dan pada rentang 1200–1500 rpm.

ABSTRACT

Increasing pelletizer speed can raise production capacity, but it may reduce the physical quality of pellets because the residence time of the material in the compression zone becomes shorter. This study analysed the effect of Dong Feng diesel engine speed (1200, 1500, and 1800 rpm) on production capacity, material utilisation efficiency (mass yield), and the physical quality of feed pellets containing 6% sawdust in a flat-die-and-roller pelletizer. A one-factor completely randomised design with three replicates (5 kg of mash per experimental unit) was used. Pellet quality was characterised by bulk density, pellet density, Pellet Durability Index (PDI), compressive strength, and moisture content following standard procedures, and the data were analysed by one-way ANOVA and Tukey's test ($\alpha = 0.05$). Increasing the speed from 1200 to 1800 rpm significantly shortened the processing time from 11.5 ± 0.1 to 9.1 ± 0.1 min ($p < 0.001$) and increased production capacity from 24.0 to 28.7 kg/h, whereas material utilisation efficiency decreased from 92% to 87%. Bulk density, pellet density, PDI, and compressive strength decreased from 685 to 628 kg/m³, 1,215 to 1,156 kg/m³, 97.2% to 91.5%, and 268 to 198 N, respectively. A weighted multi-criteria analysis with sensitivity testing showed that 1200 rpm was the best of the tested levels as long as the weight assigned to production capacity was below 0.41, while 1500 rpm became the compromise choice when productivity was prioritised. Because 1200 rpm is the lower bound of the tested range, the true optimum should be confirmed by tests at lower speeds and between 1200 and 1500 rpm.

1. PENGANTAR

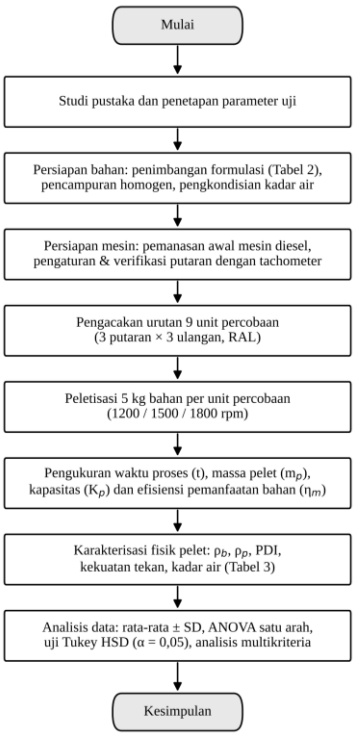
Perkembangan sektor peternakan menuntut ketersediaan pakan yang dapat diproduksi secara mandiri dengan biaya yang lebih efisien. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah memanfaatkan limbah biomassa, termasuk serbuk gergaji, sebagai bahan campuran pakan. Serbuk gergaji bersifat berserat dan kaya lignoselulosa sehingga respons pemadatannya berbeda dari bahan pakan konvensional; karakteristik tersebut memengaruhi kemampuan partikel untuk mengalami penyusunan ulang (*rearrangement*), deformasi, dan pembentukan ikatan antarpartikel selama peletisasi (He dkk., 2024; Liu dkk., 2025). Keberhasilan pencetakan pelet tidak hanya ditentukan oleh desain mesin, tetapi juga oleh kesesuaian kondisi operasi dengan karakteristik bahan. Penelitian mesin pencetak pelet telah berkembang pada aspek perancangan konstruksi, sistem transmisi, kapasitas, dan efisiensi proses, misalnya optimasi proses pada pabrik pakan unggas (Amin dkk., 2023), peletisasi limbah biomassa menggunakan sistem *flat die* (Obidziński dkk., 2020), pengembangan mesin terpadu pengaduk dan pencetak pelet untuk peternakan skala kecil (Mulyanto dkk., 2026), serta perancangan dan evaluasi kinerja mesin pelet biomassa (Ibrahim dkk., 2025; Jekayinfa dkk., 2024).

Kajian-kajian tersebut umumnya masih menempatkan kapasitas produksi, desain mesin, sistem penggerak, atau biaya produksi sebagai indikator utama keberhasilan mesin pelet (Ibrahim dkk., 2025). Penelitian yang memvariasikan parameter operasi, seperti rasio *gearbox* (Khafid dkk., 2025) atau putaran mesin pelletizer (Umam, 2026), umumnya hanya melaporkan massa atau kapasitas keluaran, tanpa karakterisasi mutu fisik pelet menggunakan prosedur baku dan tanpa pengujian statistik. Selain itu, istilah "efisiensi mesin" sering digunakan untuk besaran yang berbeda-beda, yaitu rendemen massa, rasio terhadap kapasitas teoretis, atau efisiensi energi, sehingga hasil antarpenelitian sulit dibandingkan. Padahal, pada sistem *flat die and roller*, putaran memengaruhi laju aliran bahan, frekuensi lintasan *roller* di atas *die*, waktu tinggal bahan di zona pemadatan, serta gesekan dan panas yang timbul di saluran *die* (Aali dkk., 2025; Kaliyan dkk., 2009). Peningkatan putaran berpotensi meningkatkan kapasitas, tetapi juga dapat memperpendek waktu pemadatan sehingga densifikasi dan pembentukan ikatan antarpartikel menjadi kurang sempurna. Oleh karena itu, kapasitas tinggi tanpa mutu pelet yang memadai belum dapat disebut sebagai kondisi operasi terbaik (Jekayinfa dkk., 2024; You dkk., 2025).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada tiga hal. Pertama, pengaruh putaran mesin diesel terhadap kinerja mesin (waktu proses, laju umpan, kapasitas, dan efisiensi pemanfaatan bahan) serta terhadap lima atribut mutu fisik pelet berbahan campuran serbuk gergaji dikuantifikasi secara simultan dalam satu rancangan percobaan dan diuji secara statistik. Kedua, efisiensi didefinisikan secara eksplisit sebagai efisiensi pemanfaatan bahan berbasis neraca massa, sedangkan karakterisasi mutu pelet mengikuti prosedur standar sehingga dapat direproduksi. Ketiga, penentuan kondisi operasi terbaik dilakukan secara transparan melalui analisis multikriteria berbobot yang disertai uji sensitivitas, sehingga keputusan tidak hanya didasarkan pada kapasitas tertinggi (Więckowski dkk., 2023; Xu dkk., 2024). Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh putaran mesin diesel Dong Feng sebesar 1200, 1500, dan 1800 rpm terhadap waktu proses, kapasitas produksi, dan efisiensi pemanfaatan bahan; (2) menganalisis pengaruhnya terhadap *bulk density*, densitas pelet, PDI, kekuatan tekan, dan kadar air pelet; serta (3) menentukan taraf putaran terbaik di antara taraf yang diuji berdasarkan keseimbangan antara produktivitas dan mutu pelet. Hipotesis penelitian adalah bahwa peningkatan putaran meningkatkan kapasitas produksi, tetapi menurunkan efisiensi pemanfaatan bahan dan mutu fisik pelet akibat berkurangnya waktu tinggal bahan di zona pemadatan.

2. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental kuantitatif yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan rincian mesin, bahan, prosedur pengujian, metode karakterisasi, dan analisis data diuraikan pada subbab berikut agar penelitian ini dapat direproduksi.

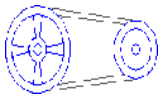
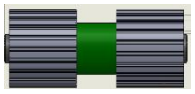
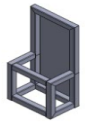


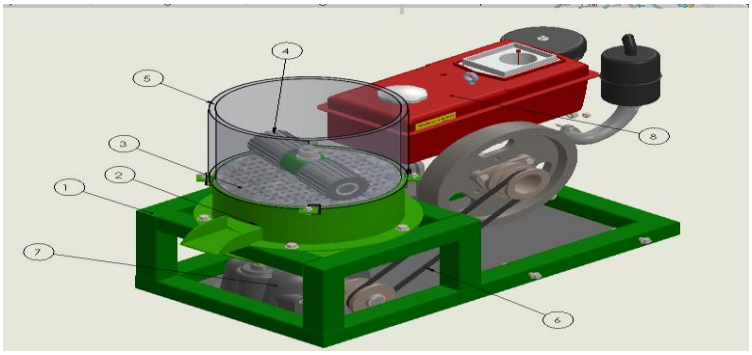
Gambar 1: Diagram alir penelitian

2.1 Mesin dan Konfigurasi Pengujian

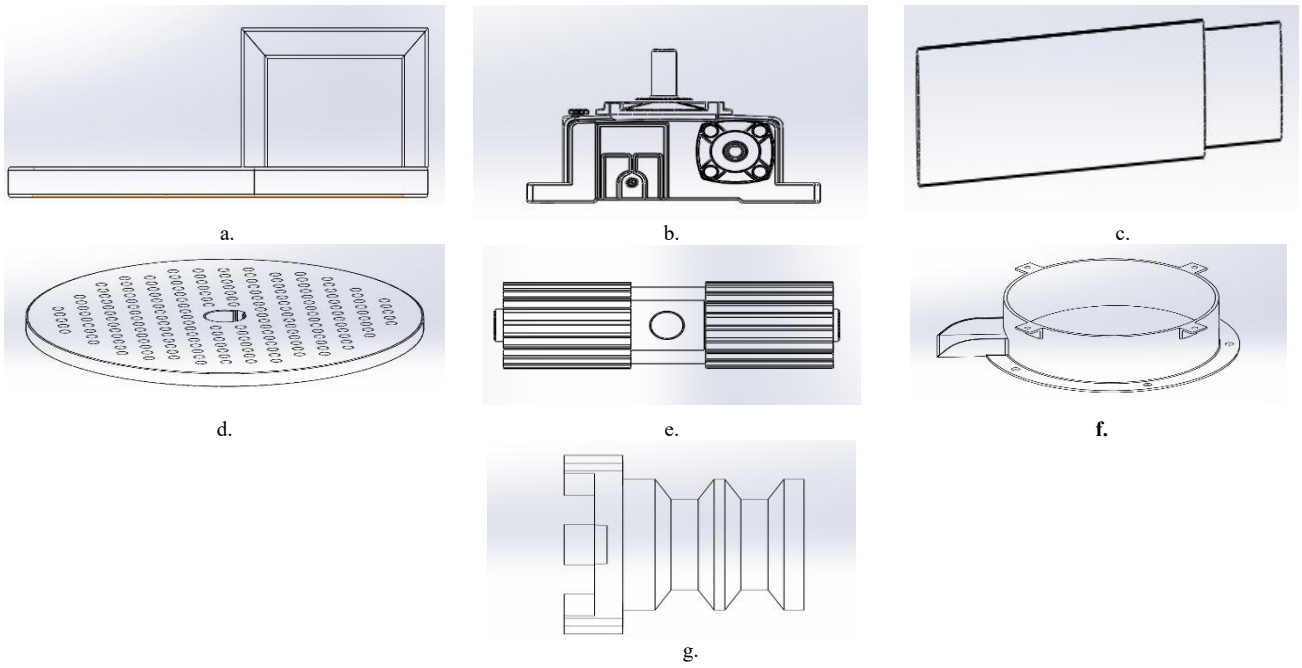
Penggerak utamanya adalah mesin diesel Dong Feng berdaya 22 HP (16,41 kW) dengan putaran nominal 2200 rpm. Daya diteruskan melalui *pulley* dan *V-belt* tipe B (panjang 1226 mm) ke *reducer* dengan rasio 20:1 yang memutar poros *flat die* dan *roller* (Tabel 1, Gambar 2, dan Gambar 3). *Flat die* berdiameter 128 mm dengan diameter lubang (d_h = 4 mm), tebal *die* (20 mm) (rasio panjang terhadap diameter lubang L/D = (20/4), dan celah *roller–die* (1 mm). Putaran mesin diatur menggunakan tuas akselerator dan diverifikasi dengan *tachometer* digital (Krisbow model QRT17, resolusi 1 rpm) pada poros/pulley mesin diesel sebelum dan selama setiap pengujian, dengan simpangan putaran dijaga dalam ±20 rpm.

Tabel 1: Spesifikasi mesin dan komponen utama

Gambar	Komponen	Fungsi	Spesifikasi
	Mesin Dong Feng	Sebagai sumber energi untuk memutar poros guna mendorong adonan melalui *roller* masuk ke cetakan	Daya 22 hp (16,41 kW) dengan putaran 2200 rpm
	*V-Belt*	Memindahkan putaran dari mesin diesel ke poros penggerak	tipe B1, L: 1226 mm
	*Bearing*	Menahan beban dari mesin	JIS 6004
	*Hopper*	Saluran masuk adonan yang akan dicetak	Bahan: SS 304, P30 mm t10 mm Tebal 5 mm
	*Reducer*	Untuk mengurangi putaran dari mesin *Dong Feng*	Perbandingan putaran 20:1
	*Plat Die* (cetakan)	Untuk mencetak adonan sesuai dengan	Diameter: 128 mm,
	*Roller*	Fungsinya adalah untuk menekan adonan masuk ke dalam cetakan	*roller*: panjang 267 mm, tinggi 80 mm,tebal 5 mm
	Tabung keluar	Tempat keluarnya adonan bahan pelet dari Lobang pelet	Diameter 31 mm, Panjang 15,Corong keluar pelet
	Rangka mesin	Tempat penahan mesin pada skala berat	Menopang mesin Dong Feng, pelletizer, sistem transmisi, serta meredam getaran saat proses produksi



Gambar 2: Rancangan mesin *pelletizer flat die and roller* hasil pemodelan SolidWorks



Gambar 3: Komponen utama mesin: (a) rangka penahan mesin, (b) transmisi putaran (*reducer*), (c) poros penghubung, (d) *flat die*, (e) *roller* penekan adonan, (f) *hopper* keluaran pelet, dan (g) *pulley* transmisi daya

Mesin terdiri atas *hopper* sebagai penampung campuran bahan sebelum memasuki ruang pencetakan, *flat die* berupa cakram berlubang yang berfungsi sebagai cetakan, dan *roller* yang menekan serta menggiling bahan ke dalam lubang-lubang *die* sehingga terjadi pemadatan. Seluruh komponen ditopang oleh rangka mesin yang juga meredam getaran selama proses produksi (Gambar 3). Karena putaran yang divariasikan adalah putaran mesin diesel, putaran *die* (n_d) yang secara langsung menentukan frekuensi lintasan *roller* dihitung dengan Persamaan (1):

$$n_d = n_e \times \frac{D_1}{D_2} \times \frac{1}{i} \tag{1}$$

Dengan n_e adalah putaran mesin diesel (rpm), D_1 dan D_2 adalah diameter *pulley* penggerak dan pulley yang digerakkan (2 inci dan 5 inci), dan i adalah rasio *reducer* (20). Dengan demikian, putaran 1200, 1500, dan 1800 rpm setara dengan putaran *die* sebesar 24, 30, dan 36 rpm.

2.2 Bahan dan Persiapan Adonan

Formulasi pakan ditunjukkan pada Tabel 2. Serbuk gergaji kayu meranti diayak menggunakan ayakan 80 *mesh* untuk menyeragamkan ukuran partikel. Seluruh bahan ditimbang menggunakan timbangan digital merek KZM, resolusi 0,1 g, kemudian dicampur secara homogen secara manual selama 15 menit. Air ditambahkan sebanyak 500 mL/kg sehingga kadar air adonan mencapai 10% (basis basah) yang diukur dengan *moisture meter* KERN DLB 160-3A. Tepung tapioka berfungsi sebagai bahan pengikat. Untuk menghilangkan pengaruh variasi bahan, adonan seluruh perlakuan berasal dari satu *batch* pencampuran yang sama, dan proporsi bahan ditetapkan berdasarkan fraksi massa terhadap total campuran (Vulla dkk., 2026).

Tabel 2: Formulasi bahan pelet per unit percobaan (5 kg)

Bahan	Fungsi dalam formulasi	Proporsi (% b/b)	Massa per unit (g)
Serbuk gergaji	Sumber serat lignoselulosa	6	300
Tepung limbah udang	Sumber protein dan mineral	20	1.000
Tepung kedelai	Sumber protein	20	1.000

Tepung jagung	Sumber energi (pati)	20	1.000
Tepung tapioka	Bahan pengikat (*binder*)	14	700
Dedak padi	Sumber energi dan serat	20	1.000
Total		100	5.000

2.3 Rancangan Percobaan dan Prosedur Pengujian

Percobaan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) satu faktor, yaitu putaran mesin dengan tiga taraf: 1200 rpm (P1), 1500 rpm (P2), dan 1800 rpm (P3). Setiap taraf diulang tiga kali sehingga diperoleh sembilan unit percobaan yang urutan pelaksanaannya diacak (Montgomery, 2010). Setiap unit percobaan menggunakan 5,00 kg adonan. Sebelum pengujian, mesin dipanaskan selama 5 menit dan dijalankan dengan 2 kg adonan yang hasilnya tidak diikutkan dalam perhitungan agar *die* mencapai kondisi kerja yang stabil. Waktu proses (t) diukur dengan *stopwatch* sejak adonan pertama dimasukkan hingga tidak ada lagi pelet yang keluar. Pelet yang dihasilkan didinginkan pada suhu ruang selama 30 menit, diayak untuk memisahkan *fines*, lalu ditimbang (m_p). Laju umpan, kapasitas produksi, dan efisiensi pemanfaatan bahan dihitung dengan Persamaan (2)–(4):

$$Q_{in} = \frac{m_{in}}{t} \times 60 \tag{2}$$

$$K_p = \frac{m_p}{t} \times 60 \tag{3}$$

$$\eta_m = \frac{m_p}{m_{in}} \times 100\% \tag{4}$$

Dengan m_{in} adalah massa adonan yang diumpankan (5,00 kg), m_p adalah massa pelet utuh setelah pengayakan (kg), dan t adalah waktu proses (menit). Efisiensi pemanfaatan bahan (η_m) merupakan rendemen massa, yaitu fraksi adonan yang berhasil dikonversi menjadi pelet utuh; besaran ini bukan efisiensi mekanis maupun efisiensi energi mesin karena daya poros dan konsumsi bahan bakar tidak diukur dalam penelitian ini. Karena laju umpan dan kapasitas dihitung pada waktu proses yang sama, η_m juga sama dengan K_p/Q_{in}.

2.4 Karakterisasi Kualitas Fisik Pelet

Sampel pelet dari setiap unit percobaan disimpan dalam kantong plastik tertutup dan diuji 24 jam setelah produksi. Metode, acuan, dan jumlah sampel untuk setiap parameter dirangkum dalam Tabel 3. *Bulk density* (ρ_b) ditentukan dengan menuangkan pelet ke dalam wadah silinder bervolume (1 L) dari ketinggian (300 mm), meratakan permukaannya tanpa pemadatan, lalu menimbangnya (ASAE, 2012). Densitas pelet (ρ_p) ditentukan secara stereometri dari massa, diameter, dan panjang pelet tunggal yang diukur menggunakan timbangan analitik (resolusi 0,001 g) dan jangka sorong (resolusi 0,01 mm) (ISO 2016) dihitung dengan Persamaan 5-6:

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_w} \tag{5}$$

$$\rho_p = \frac{4\, m_s}{\pi\, d^2\, l} \tag{6}$$

Dengan m_b adalah massa pelet di dalam wadah (kg), V_w adalah volume wadah (m³), m_s adalah massa pelet tunggal (kg), serta d dan l adalah diameter dan panjang pelet (m). PDI ditentukan dengan metode *tumbling box*: 500 g pelet yang telah diayak diputar pada 50 rpm selama 10 menit, kemudian diayak kembali menggunakan ayakan dengan bukaan sekitar 0,8 kali diameter pelet (ASAE, 2012). Kadar air (MC) ditentukan dengan metode oven pada 105 °C hingga bobot konstan (Latimer Jr, 2023):

$$PDI = \frac{m_a}{m_0} \times 100\% \tag{7}$$

$$MC = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \tag{8}$$

Di mana m_0 dan m_a adalah massa pelet sebelum dan sesudah *tumbling* (g), serta W_1 dan W_2 adalah massa sampel sebelum dan sesudah pengeringan (g). Kekuatan tekan (F_c) ditentukan dengan uji tekan diametral, yaitu pelet diletakkan mendatar di antara dua pelat sejajar pada (Tekan hidrolik (*Compression Testing Machine*) dengan kecepatan pembebanan 0,15 MPa/detik sampai dengan 0,35 MPa/detik), dan gaya maksimum saat pelet retak dicatat sebagai kekuatan tekan. Kadar air berpengaruh terhadap daya simpan dan stabilitas fisik pelet pakan (Yu dkk., 2023), sehingga hasilnya juga dibandingkan dengan batas maksimum kadar air pada SNI 3148.2:2017 (Nasional dkk., 2009).

Tabel 3: Parameter respons, metode, dan acuan pengujian

Parameter	Simbol (satuan)	Metode/prosedur	Acuan	Sampel per unit
Waktu proses	t (menit)	*Stopwatch*; umpan pertama hingga pelet terakhir keluar	–	1
Laju umpan	Q_{in} (kg/jam)	Pers. (2)	–	1
Kapasitas produksi	K_p (kg/jam)	Pers. (3); massa pelet utuh setelah diayak	–	1
Efisiensi pemanfaatan bahan	η_m (%)	Pers. (4); neraca massa (rendemen)	–	1
Bulk density	ρ_b (kg/m³)	Wadah silinder bervolume tetap; Pers. (5)	ASABE S269.5; ISO 17828	3
Densitas pelet	ρ_p (kg/m³)	Stereometri (jangka sorong 0,01 mm; timbangan 0,001 g); Pers. (6)	ISO 18847	10 pelet
Pellet Durability Index	PDI (%)	*Tumbling box* 500 g, 50 rpm, 10 menit; Pers. (7)	ASABE S269.5	2

Parameter	Simbol (satuan)	Metode/prosedur	Acuan	Sampel per unit
Kekuatan tekan	F_c (N)	Uji tekan diametral; gaya maksimum saat pecah	Kaliyan dan Morey (2009)	10 pelet
Kadar air	MC (% b.b.)	Oven 105 °C hingga bobot konstan; Pers. (8)	AOAC (2019)	2

2.5 Analisis Statistik dan Penentuan Kondisi Operasi Terbaik

Unit statistik adalah unit percobaan (n = 3 per taraf); hasil pengukuran sub-sampel dalam satu unit percobaan dirata-ratakan terlebih dahulu untuk menghindari pseudoreplikasi. Data disajikan sebagai rata-rata ± simpangan baku (SD). Normalitas residu dan homogenitas ragam diuji dengan uji Shapiro–Wilk dan Levene, kemudian pengaruh putaran diuji dengan ANOVA satu arah pada α = 0,05, dilanjutkan dengan uji Tukey HSD. Besarnya pengaruh perlakuan dinyatakan dengan *eta squared* (η^2). Analisis dilakukan menggunakan Minitab versi 20 (Paraschiv dkk., 2021).

Karena tiga taraf putaran tidak memadai untuk membangun model permukaan respons, kondisi operasi terbaik ditentukan dengan analisis multikriteria berbobot (*simple additive weighting*) terhadap lima kriteria yang semuanya bersifat "semakin besar semakin baik", yaitu K_p, η_m, ρ_b, PDI, dan F_c. Densitas pelet tidak dimasukkan karena berkorelasi kuat dengan ρ_b, sedangkan kadar air diperlakukan sebagai batasan mutu. Nilai setiap kriteria dinormalisasi dengan Persamaan (9) dan skor komposit dihitung dengan Persamaan (10) (Więckowski dkk., 2023).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \tag{9}$$

$$S_i = \sum_{j=1}^{5} w_j \, r_{ij}, \quad \sum_{j=1}^{5} w_j = 1 \tag{10}$$

Dengan x_{ij} adalah nilai rata-rata kriteria j pada taraf i, r_{ij} adalah nilai ternormalisasi (0–1), dan w_j adalah bobot kriteria. Tiga skenario bobot dievaluasi, yaitu A (bobot setara), B (prioritas mutu), dan C (prioritas produktivitas), kemudian dilakukan uji sensitivitas dengan mengubah bobot K_p dari 0 hingga 1 sementara sisa bobot dibagi rata pada empat kriteria lainnya. Normalisasi dilakukan relatif terhadap rentang hasil uji sehingga analisis ini menentukan taraf terbaik di antara taraf yang diuji, bukan optimum global.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Waktu Proses dan Kapasitas Produksi

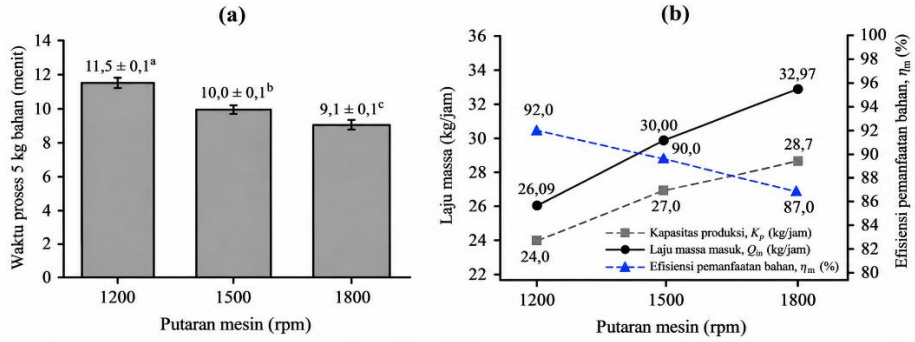
Waktu proses dan laju umpan pada setiap ulangan disajikan pada Tabel 4. Putaran mesin berpengaruh sangat nyata terhadap waktu proses ($F(2,6) = 441{,}0$; $p < 0{,}001$; $\eta^2 = 0{,}99$). Uji Tukey menunjukkan bahwa ketiga taraf putaran berbeda nyata satu sama lain ($p \leq 0{,}001$). Waktu proses 5 kg adonan turun dari 11,5 ± 0,1 menit pada 1200 rpm menjadi 10,0 ± 0,1 menit pada 1500 rpm dan 9,1 ± 0,1 menit pada 1800 rpm, sehingga laju umpan meningkat dari 26,09 ± 0,23 menjadi 30,00 ± 0,30 dan 32,97 ± 0,36 kg/jam ($F(2,6) = 393{,}1$; $p < 0{,}001$).

Tabel 4: Waktu proses dan laju umpan pada setiap ulangan

Putaran (rpm)	Ulangan 1 (menit)	Ulangan 2 (menit)	Ulangan 3 (menit)	Waktu proses rata-rata ± SD (menit)	Q_{in} rata-rata ± SD (kg/jam)
1200 (P1)	11,4	11,5	11,6	$11{,}5 \pm 0{,}1^a$	$26{,}09 \pm 0{,}23^c$
1500 (P2)	9,9	10,0	10,1	$10{,}0 \pm 0{,}1^b$	$30{,}00 \pm 0{,}30^b$
1800 (P3)	9,0	9,1	9,2	$9{,}1 \pm 0{,}1^c$	$32{,}97 \pm 0{,}36^a$
ANOVA				$F(2,6) = 441{,}0$; $p < 0{,}001$	$F(2,6) = 393{,}1$; $p < 0{,}001$

Keterangan: huruf superskrip yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang signifikan berdasarkan uji Tukey HSD (α = 0,05); $Q_{in} = 5$ kg/(t/60).

Kapasitas produksi pelet meningkat dari 24,0 kg/jam (1200 rpm) menjadi 27,0 kg/jam (1500 rpm) dan 28,7 kg/jam (1800 rpm) (Gambar 4 dan Tabel 5). Kenaikan kapasitas sebesar 12,5% dari 1200 ke 1500 rpm menyusut menjadi 6,2% dari 1500 ke 1800 rpm, padahal laju umpan masih naik masing-masing sebesar 15,0% dan 9,9%. Selisih antara kenaikan laju umpan dan kenaikan kapasitas menunjukkan bahwa semakin besar porsi bahan yang tidak terkonversi menjadi pelet utuh pada putaran tinggi. Peningkatan putaran memperbanyak lintasan *roller* per satuan waktu sehingga laju aliran bahan melalui *die* meningkat (Aali dkk., 2025; Qurohman dkk., 2020), tetapi sekaligus memperpendek waktu tinggal bahan di zona pemadatan. Dengan demikian, kapasitas tertinggi pada 1800 rpm tidak dapat langsung disimpulkan sebagai kondisi operasi terbaik sebelum efisiensi pemanfaatan bahan dan mutu pelet dipertimbangkan (Khafid dkk., 2025).



Gambar 4: (a) Waktu proses 5 kg adonan (rata-rata ± SD, n = 3; huruf berbeda menunjukkan beda nyata menurut uji Tukey, α = 0,05) dan (b) laju umpan, kapasitas produksi, serta efisiensi pemanfaatan bahan pada setiap putaran mesin

3.2 Efisiensi Pemanfaatan Bahan

Efisiensi pemanfaatan bahan ditentukan berdasarkan neraca massa sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (4), dengan hasil pengukuran disajikan pada Tabel 5. Dari total 5,00 kg adonan yang digunakan, massa pelet utuh yang dihasilkan masing-masing mencapai 4,60 kg pada 1200 rpm, 4,50 kg pada 1500 rpm, dan 4,35 kg pada 1800 rpm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan putaran mesin menyebabkan penurunan efisiensi pemanfaatan bahan (η_m), yaitu dari 92,0% menjadi 90,0% dan 87,0%, dengan perbedaan yang signifikan secara statistik ($p = 0,003$). Sejalan dengan penurunan tersebut, kehilangan massa meningkat dari 0,40 kg pada 1200 rpm menjadi 0,65 kg pada 1800 rpm. Kehilangan massa ini berasal dari pembentukan fines, adonan yang tidak berhasil tercetak, serta sisa bahan yang tertinggal di dalam ruang die. Parameter tersebut didefinisikan secara konsisten sebagai efisiensi pemanfaatan bahan (rendemen massa), bukan efisiensi mesin, karena perhitungannya didasarkan pada perbandingan massa pelet utuh terhadap massa adonan awal. Selain itu, nilai laju umpan pada 1800 rpm dikoreksi dari 33,33 menjadi 32,97 kg/jam berdasarkan massa adonan 5,00 kg dan waktu proses 9,1 menit. Kapasitas produksi pada putaran yang sama juga dikoreksi dari 29,0 menjadi 28,7 kg/jam sesuai hasil pengukuran yang disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5: Neraca massa, kapasitas produksi, dan efisiensi pemanfaatan bahan

Putaran (rpm)	m_{in} (kg)	m_p (kg)	Kehilangan massa (kg)	Q_{in} (kg/jam)	K_p (kg/jam)	η_m (%)
1200	5,00	4,60 ± 0,1	0,40	26,09	24,0 ± 0,1	92,0 ± 1
1500	5,00	4,50 ± 0,1	0,50	30,00	27,0 ± 0,1	90,0 ± 1
1800	5,00	4,35 ± 0,1	0,65	32,97	28,7 ± 0,1	87,0 ± 1
p (ANOVA)	–	0,058	–	< 0,001	< 0,001	0,003

Keterangan: $K_p = m_p/(t/60)$; $\eta_m = m_p/m_{in} \times 100\%$. Nilai rata-rata ± SD dari tiga ulangan.

Penurunan η_m pada putaran tinggi sejalan dengan semakin singkatnya waktu kontak antara bahan dengan *flat die* dan *roller*, sehingga sebagian bahan melewati *die* tanpa pemadatan yang cukup dan keluar sebagai *fines* (Elfina dkk., 2025). Perlu ditegaskan bahwa η_m tidak menggambarkan efisiensi energi; evaluasi energi memerlukan pengukuran konsumsi bahan bakar atau daya poros untuk memperoleh konsumsi energi spesifik (kWh/kg pelet), yang direkomendasikan untuk penelitian lanjutan.

3.3 Kualitas Fisik Pelet

Hasil karakterisasi fisik pelet disajikan pada Tabel 6. Peningkatan putaran dari 1200 menjadi 1800 rpm menurunkan *bulk density* sebesar 8,3% (685 menjadi 628 kg/m³), densitas pelet sebesar 4,9% (1.215 menjadi 1.156 kg/m³), PDI sebesar 5,7 poin persentase (97,2% menjadi 91,5%), dan kekuatan tekan sebesar 26,1% (268 menjadi 198 N).

Tabel 6: Kualitas fisik pelet pada setiap putaran mesin

Putaran (rpm)	*Bulk density* ρ_b (kg/m³)	Densitas pelet ρ_p (kg/m³)	PDI (%)	Kekuatan tekan F_c (N)	Kadar air MC (%)
1200	685 ± 1	1.215 ± 0,02	97,2 ± 1,1	268 ± 1,5	10,8 ± 0,2
1500	660 ± 2	1.185 ± 0,015	94,8 ± 1,2	231 ± 2,5	10,2 ± 0,1
1800	628 ± 1	1.156 ± 0,012	91,5 ± 1,0	198 ± 1,0	9,7 ± 0,1
p (ANOVA)	< 0,001	0,012	0,002	< 0,001	< 0,001

Penurunan mutu fisik tersebut dapat dijelaskan melalui mekanisme densifikasi. Kekuatan dan durabilitas pelet ditentukan oleh terbentuknya jembatan padat, *interlocking* serat, serta aktivasi bahan pengikat yang memerlukan tekanan, suhu, dan waktu tinggal yang cukup di saluran *die* (Kaliyan dkk., 2009). Pada putaran tinggi, waktu tinggal yang lebih singkat mengurangi kesempatan partikel serbuk gergaji yang kaku dan elastis untuk tersusun ulang dan berikatan, sehingga pelet lebih berpori, lebih mudah mengalami relaksasi setelah keluar dari *die*, dan lebih rapuh. Tepung tapioka sebagai pengikat membantu ikatan antarpartikel, dan pengaruhnya paling efektif pada putaran rendah ketika waktu kontak lebih panjang (Azzahra dkk., 2022; Word dkk., 2023). Seluruh perlakuan menghasilkan PDI di atas 90%, tetapi hanya 1200 rpm yang melampaui 95%. Durabilitas yang tinggi penting untuk menekan pembentukan *fines* selama penanganan dan transportasi pakan (You dkk., 2025).

Kadar air pelet menurun dari 10,8% menjadi 9,7% seiring kenaikan putaran ($p = 1800$ rpm), yang diduga disebabkan oleh panas gesekan yang lebih besar di saluran *die* pada putaran tinggi. Seluruh nilai kadar air berada di bawah batas maksimum SNI 3148.2:2017 (Nasional dkk., 2009), sehingga kadar air diperlakukan sebagai batasan mutu yang terpenuhi pada seluruh taraf dan tidak dijadikan kriteria pembeda dalam penentuan kondisi operasi terbaik.

3.4 Penentuan Kondisi Operasi Terbaik

Hasil analisis multikriteria disajikan pada Tabel 7. Pada skenario bobot setara (A) dan prioritas mutu (B), putaran 1200 rpm memperoleh skor komposit tertinggi (0,800 dan 0,900), diikuti oleh 1500 rpm (0,571 dan 0,556) dan 1800 rpm (0,200 dan 0,100). Pada skenario prioritas produktivitas (C), skor 1200 rpm (0,600) dan 1500 rpm (0,595) hampir sama. Uji sensitivitas menunjukkan bahwa 1200 rpm tetap menjadi taraf terbaik selama bobot kapasitas produksi kurang dari 0,41. Pada bobot kapasitas 0,41–0,61, taraf terbaik bergeser ke 1500 rpm, dan baru pada bobot di atas 0,61 putaran 1800 rpm menjadi pilihan terbaik. Hasil ini sejalan dengan perhitungan kapasitas pelet tahan uji ($K_p \times$ PDI), yaitu 23,3; 25,6; dan 26,2 kg/jam pada 1200, 1500, dan 1800 rpm, yang menunjukkan bahwa jika tujuan tunggalnya adalah produktivitas, putaran yang lebih tinggi tetap menguntungkan.

Tabel 7: Nilai ternormalisasi dan skor komposit analisis multikriteria

Putaran (rpm)	$r(K_p)$	$r(\eta_m)$	$r(\rho_b)$	r(PDI)	$r(F_c)$	S_A	S_B	S_C
1200	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	**0,800**	**0,900**	**0,600**
1500	0,64	0,60	0,56	0,58	0,47	0,571	0,556	0,595
1800	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,200	0,100	0,400

Keterangan: bobot (K_p; η_m; ρ_b; PDI; F_c) skenario A = 0,20 untuk setiap kriteria; B (prioritas mutu) = 0,10; 0,10; 0,25; 0,30; 0,25; C (prioritas produktivitas) = 0,40; 0,20; 0,10; 0,20; 0,10. Skor tertinggi pada setiap skenario dicetak tebal.

Dengan demikian, untuk produksi pakan skala kecil yang mengutamakan durabilitas dan efisiensi bahan, putaran 1200 rpm direkomendasikan sebagai kondisi operasi terbaik di antara taraf yang diuji, sedangkan 1500 rpm merupakan alternatif kompromi apabila kapasitas lebih diutamakan. Klaim ini dibatasi pada rentang uji: karena 1200 rpm merupakan batas bawah rentang percobaan dan respons mutu masih meningkat ke arah putaran rendah, titik optimum sebenarnya dapat berada di bawah 1200 rpm atau di antara 1200–1500 rpm. Untuk memastikan optimum tersebut diperlukan percobaan lanjutan dengan taraf putaran yang lebih banyak, misalnya 900, 1050, 1200, 1350, dan 1500 rpm, pemodelan permukaan respons, serta uji konfirmasi pada titik optimum hasil (Umam, 2026; Więckowski dkk., 2023; Xu dkk., 2024).

4. KESIMPULAN

Putaran mesin diesel Dong Feng berpengaruh nyata terhadap kinerja mesin *pelletizer flat die and roller* dengan bahan campuran serbuk gergaji. Peningkatan putaran dari 1200 menjadi 1800 rpm menurunkan waktu proses 5 kg adonan dari 11,5 ± 0,1 menjadi 9,1 ± 0,1 menit ($p < 0,001$) dan meningkatkan kapasitas produksi dari 24,0 menjadi 28,7 kg/jam dengan kenaikan yang semakin mengecil. Sebaliknya, efisiensi pemanfaatan bahan (rendemen massa) turun dari 92% menjadi 87%, sedangkan *bulk density*, densitas pelet, PDI, dan kekuatan tekan menurun masing-masing sebesar 8,3%, 4,9%, 5,7 poin persentase, dan 26,1%. Analisis multikriteria menunjukkan bahwa 1200 rpm merupakan taraf terbaik di antara taraf yang diuji selama bobot kapasitas kurang dari 0,41, sedangkan 1500 rpm menjadi pilihan kompromi apabila produktivitas lebih diprioritaskan. Karena 1200 rpm adalah batas bawah rentang uji, hasil ini belum membuktikan optimum global.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas jumlah dan rentang taraf putaran, termasuk di bawah 1200 rpm dan di antara 1200–1500 rpm, menerapkan metodologi permukaan respons, dan melakukan uji konfirmasi pada titik optimum hasil prediksi. Pengukuran konsumsi bahan bakar atau daya poros juga perlu dilakukan untuk memperoleh konsumsi energi spesifik, disertai variasi kadar air adonan, ukuran partikel serbuk gergaji, proporsi pengikat, dan geometri lubang *die*, agar diperoleh dasar yang lebih komprehensif bagi penerapan mesin *pelletizer* pada skala produksi yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara atas fasilitas, izin, dan bantuan teknis yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Aulia Rahman : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Analisis Formal, Visualisasi, Penulisan – Draf Awal.
Suherman: Metodologi, Validasi, Penyediaan Sumber Daya, Supervisi, Penulisan – Tinjauan dan Penyuntingan.

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan. Seluruh penulis juga bertanggung jawab atas integritas, keakuratan, dan keabsahan isi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Aali, M., Löw-Baselli, B., Zecevic, J., & Berger-Weber, G. (2025). Assessing Flight Angle and Rotor Speed Effects on Drying Efficiency and Power Consumption of the Centrifugal Dryer of Pelletizing Systems. *Polymers, 17*(13), 1829.

Amin, S. A. S., & Sobhi, N. (2023). Process optimization in poultry feed mill. *Scientific Reports, 13*(1), 9897.

ASAE. (2012). Densified products for bulk handling—definitions and method. ASAE Standard S269. 5. In: ASABE, St Joseph, MI.

Azzahra, Y. R., Toharmat, T., & Prihantoro, I. (2022). Evaluasi Ciri Fisik Media Terfermentasi Jamur Pleurotus ostreotus sebagai Pakan Ternak Alternatif bagi Ruminansia. *Indonesian Journal of Agricultural Sciences/Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 27*(3), 351.

Elfina, S., Arifin, M., Syafri, E., & Azharman, Z. (2025). Engineering of a fish feed pellet machine to improve production efficiency.

He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W., & Wu, K. (2024). From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. *Biomass and Bioenergy, 186*, 107271.

Ibrahim, M. M., Younis, S. M., Taieb, A. E.-A. Z., Azzam, B., & Ghonimy, M. (2025). Design and performance assessment of a pelleting machine for sustainable biomass pellet fuel production from plant residues. *Scientific Reports, 15*(1), 12879.

Jekayinfa, S. O., Ola, F. A., Akande, F. B., Adesokan, M. A., & Abdulsalam, I. A. (2024). Modification and performance evaluation of a biomass pelleting machine. *AgriEngineering, 6*(3), 2214-2228.

Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy, 33*(3), 337-359.

Khafid, A. L., Hadi, F. S., Pramitasari, R. E., & Wati, D. A. R. (2025). Analisis Variasi Gearbox Terhadap Massa Hasil Produksi Mesin Pembuat Pelet. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa, 2*(2), 401-409.

Latimer Jr, G. W. (2023). *Official methods of analysis of AOAC INTERNATIONAL: 3-volume set*: Oxford University Press.

Liu, H., Ma, X., Hou, Z., Chen, L., Tan, A., & Liu, Y. (2025). Simulation and experimental study on the optimization of operating parameters for coating pellets of Agropyron seeds. *Agriculture, 15*(19), 2017.

Montgomery, D. C. (2010). *Design and analysis of experiments, Minitab manual*: John wiley & sons.

Mulyanto, T., & Williyanto, V. (2026). Perancangan dan Fabrikasi Mesin Terpadu Pengaduk dan Pencetak Pelet Pakan Ternak Kapasitas 20 Kg/Jam Untuk Peternakan Skala Kecil. *Teknik dan Kajian Multidisiplin Aplikatif, 2*(1), 78-90.

Nasional, B. S., Ics, I., & Nasional, B. (2009). Pakan Konsentrat Bagian 2: Sapi Potong. *SNI, 3148*, 2009.

Obidziński, S., Puchlik, M., & Dołżyńska, M. (2020). Pelletization of post-harvest tobacco waste and investigation of flue gas emissions from pellet combustion. *Energies, 13*(22), 6002.

Paraschiv, G., Moiceanu, G., Voicu, G., Chitoiu, M., Cardei, P., Dinca, M. N., & Tudor, P. (2021). Optimization issues of a hammer mill working process using statistical modelling. *Sustainability, 13*(2), 973.

Qurohman, M. T., Romadhon, S. A., & Usman, W. J. (2020). Efektivitas Putaran Terhadap Hasil Cacah Pada Mesin Shredder Plastik. *Nozzle: Journal Mechanical Engineering, 9*(1), 10-14.

Umam, M. A. (2026). Uji Kinerja Mesin Pelletizer untuk Produksi Biopelet Berbasis Limbah Sorgum di Pabrik Mini Pengolahan Sorgum Kelompok Tani Margo Santoso Demak. *Jurnal Mesin Material Manufaktur dan Energi, 6*(1), 147-156.

Vulla, K. E., Mmanda, F. P., & Makule, E. (2026). Potential Application of Linear Programming Method and Solid-State Fermentation in Improving the Quality of Fish Feed and Profits of Small-Scale Nile Tilapia (Oreochromis niloticus) Farming in Tanzania. *Aquaculture, Fish and Fisheries, 6*(1), e70182.

Więckowski, J., & Sałabun, W. (2023). Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Applied Soft Computing, 148*, 110915.

Word, L. E., & Adipu, Y. (2023). Kualitas Pakan Pelet Ikan Dari Limbah Ternak. *Gorontalo Fisheries Journal, 6*(1), 1-9.

Xu, Y., Huang, J., Wang, J., Yu, G., & Xu, X. (2024). Optimization of Molding Process Parameters of Caragana korshinskii Kom. Based on Box-Behnken Design. *Forests, 15*(12), 2086.

You, J., Hall, K., Civiero, J., Malpass, M. C., Tulpan, D., & Ellis, J. L. (2025). Evaluating variables affecting Pellet Durability Index (PDI) in pelleted corn-soy-based feeds for swine and poultry: A meta-analysis. *Animal feed science and technology*, 116566.

Yu, Z., Chen, X., Zhang, J., Su, Q., Wang, K., & Liu, W. (2023). Rapid and non-destructive estimation of moisture content in caragana korshinskii pellet feed using hyperspectral imaging. *Sensors, 23*(17), 7592.